秦岭山区-黄土高原地区生态基流区域差异及其阈值研究

杨晓亚[1]， 于坤霞[1]， 李占斌[1]， 李 鹏[1,2]， 刘永刚[3]， 莫淑红[1]， 杨建宏[3]

（1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西 西安 710048；2. 西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室，陕西 西安 710048；3. 陕西省水资源与河库调度中心，陕西 西安 710004）

摘 要： 秦岭山区-黄土高原地质地貌连续区生态系统十分脆弱，河道生态基流及其阈值对生态系统的保护十分重要。以秦岭山区-黄土高原为研究区域，构建了涵盖气候、植被、地形地貌、土层结构、流域形态及社会经济6个方面特征的22个生态基流影响因子体系，通过构建自组织映射(SOM)神经网络和*K*-means聚类分析法，依据上述影响因子将秦岭山区-黄土高原划分为黄土高原中部、秦岭南麓、秦岭北麓和黄土高原西北部4个子区域，利用偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)对3个子区域的生态基流影响因素进行了建模与分析。结果表明：(1) 黄土高原中部的生态基流主要受降水集中度的影响，秦岭南麓主要受年平均气温的影响，秦岭北麓主要受土壤含水量影响。(2) 不同子区域生态基流存在显著的区域性差异，黄土高原中部、秦岭南麓、秦岭北麓、黄土高原西北部生态基流占比阈值分别为7.9%、9.5%、7.5%、4.1%。(3) 考虑不同子区域生态基流对环境变化的响应差异，建立了一个可用于计算和模拟生态基流的线性回归模型，模型决定性系数均大于0.87。研究结果不仅为生态基流的量化估算提供了科学依据，也对河流健康的维护与水资源的可持续利用提供了参考，具有重要的理论与实践价值。

关 键 词： 生态基流；聚类分析；流量阈值；结构方程；影响因素
文章编号： 1000-6060(2025)03-0380-11(0380~0390)

生态基流是指为保持河流的基本形态和生态功能所必须维持的最低水流[1]。其核心目的在于确保河流的连通性，以保护水生生物的栖息地，防止其遭受不可逆转的破坏，对于河流生态系统的整体健康至关重要。生态基流不足会造成河流纳污能力和稀释自净能力降低、地下水位下降、水土流失、水生生物栖息地环境恶化等生态环境问题[2]。因此，生态基流对于维持河流生态系统平衡、保持流域的整体性和连续性等特征具有重要的意义。

目前，生态基流的计算方法主要有水文学法、水力学法、水文-生物分析法、栖息地法、整体分析法[3]。水力学法主要应用现场实测水力学数据确定生态基流，适用于小型河流或者流量很小且相对稳定的河流。栖息地法通过分析河道流量与栖息地指示因子之间的关系确定生态基流，但只能针对特定的物种，具有局限性[4]。水文学法主要依据流量等水文数据，计算简单便捷，应用范围广，但通常忽略了水生生物的生物特性[5]。整体分析法被认为是未来生态基流计算的主要方法[6]，但需要丰富的水文、生态、社会和经济等数据，且依赖专业判断和专家意见，耗时且昂贵。因此，本研究使用水文学法计算生态基流。

生态基流具有时空分异性、质量共存性、动态变化性、特定目标性、阈值性等特征[7]。王一艳等[8]对渭河流域生态基流时空分异性的研究发现，渭河流域生态基流上游低、下游高，证明了空间上划分生态基流子区域的可行性与必要性。李娟等[9]研究发现梯田面积的增加将使生态基流保障程度提高，且径流受土地利用类型影响显著[10]，说明下垫面对于生态基流起着不可忽视的作用。因此，本研究影

收稿日期： 2024-03-18； **修订日期：** 2024-06-04
基金项目： 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLSF-60)；国家自然科学基金项目(52079104)；宁夏水利科学研究院项目(SKYZY-2024005)；陕西省青年科技新星项目(2024ZC-KJXX-058)资助
作者简介： 杨晓亚(1999-)，女，硕士研究生，主要从事水文学及水资源研究. E-mail: yangxiaoya0212@163.com
通讯作者： 于坤霞(1989-)，女，博士，副教授，主要从事水文学及水资源研究. E-mail: yukunxia@126.com

响因子中加入地形地貌、植被覆盖因子来体现下垫面的特征。郑爱勤[11]对地下水的研究发现，渭河关中段95%的地区为地下水补给河流，说明该区域河流处于过度用水状态，保障河道生态基流至关重要。尽管当前对生态基流的研究已揭示其多维特性和影响因素，但缺乏针对不同河流和尺度的系统性研究来深入理解其时空变化及影响因子。

本研究从秦岭山区-黄土高原空间区域性特征出发，基于流域水文气象、自然地理、社会经济等特征，对研究区划分子区域，识别主要影响因子与生态基流的关系，建立各子区域生态基流占比阈值，以期为该地区的水资源管理和水生态保护提供参考，为以后的生态基流估算工作提供科学依据，对保障河流健康、实现水资源可持续利用具有重要价值。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

秦岭山区-黄土高原(100°54′~114°33′E，32°18′~41°16′N)地处亚欧大陆内部(图1)，区域内水系主要有黄河及汉江的一些支流。研究区涵盖了陕西省、山西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、河南省、湖北省，具有显著的气候、地形和生态差异，是重要的生态屏障和农业区。该区域属于温带大陆性干旱半干旱气候，夏季温暖湿润、冬季寒冷干燥，多年平均降水量200~1400 mm，多数降水发生在6—9月，多年平均气温4~13 ℃。主要土地利用类型为草地、森林和耕地，是中国森林-草原-荒漠的关键生态过渡带。黄土高原属于黄河流域，其海拔、纬度、气候等环境滋养、孕育了灿烂的中华文明，使其扎根于此并不断进化，堪称“中华民族灿烂文明的发祥地”[12]。秦岭是中国两大流域黄河、长江的分界线之一，是中国重要的生物多样性保护区，是黄土高原的南部边界，也是南北气候的分界线。秦岭地区拥有丰富的动植物种类，是许多珍稀物种的栖息地。

1.2　数据来源

研究区水文站数据来自各地区水文统计年鉴，其中大武口站、汝箕沟站、郭家桥站、鸣沙洲站、泉眼山站、韩府湾站、彭阳站、隆德站、泾河源站数据为1989—2019年，张家山站、皇甫川站、温家川站、绥德站、义棠站、兰村站、华县站、状头站、白家川站、甘谷驿站数据为1960—2019年，景村站、芦村河站数据为1988—2019年，黑峪口站、涝峪口站、秦渡镇站、马渡王站数据为1973—2019年，罗李村站数据为2001—2019年，陈河站数据为2007—2019年，西水街站、柴坪站、南宽坪站、马道站、升仙村站、荆紫关站、两河口站、向家坪站数据为1990—2019年，

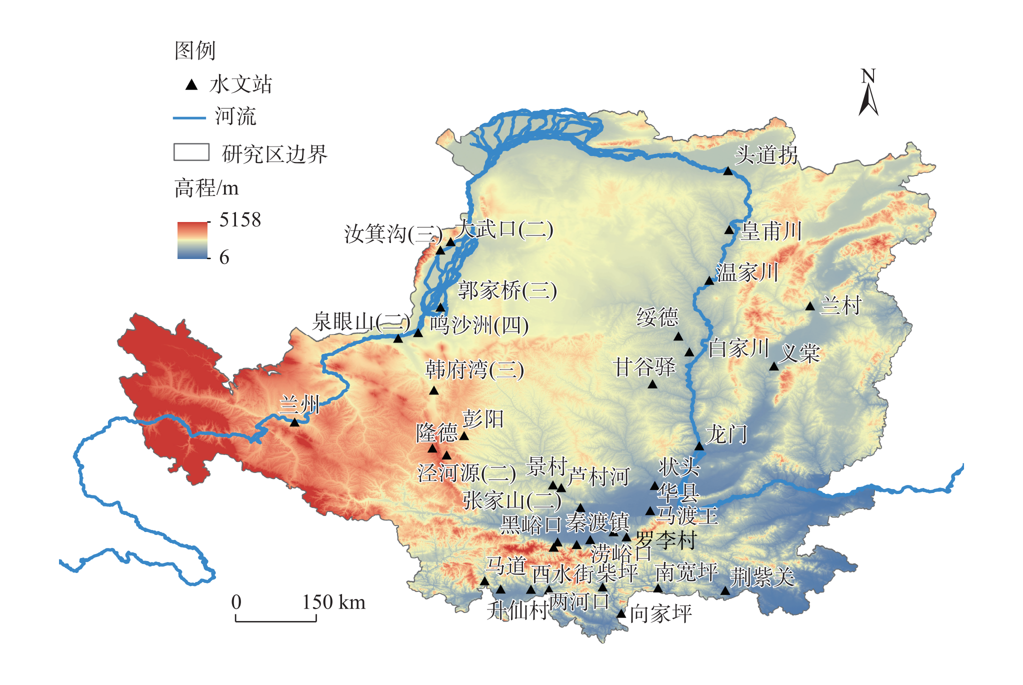


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

兰州站数据为1967—2019年，头道拐站、龙门站数据为1970—2019年。水文站数据满足Q90法要求的数据长度大于10 a的要求[13]。1960—2020年降水量、地表净太阳辐射、0~7 cm土壤含水量、叶面积指数数据来自ERA5-Land月平均数据(https://cds.climate.copernicus.eu/)。1960—2020年年平均气温、潜在蒸散发数据来自国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)。1998—2019年归一化植被指数(NDVI)、2000—2020年净初级生产力(NPP)、土壤质地、1995—2019年地区生产总值(GDP)、1990—2019年人口、1992—2013年夜间灯光数据来自中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn/)。数字高程模型(DEM)来自地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)。1985—2019年土地利用数据来自武汉大学杨杰教授的数据集[14]，分辨率为30 m。具体影响因子及来源如表1所示。

表1 生态基流控制因子体系

Tab. 1 Control factors system of ecological base flow

分类	影响因子	来源
气候条件	年降水量(P)	由遥感数据统计
	降水变异系数(P_{CV})	降水量标准偏差/年降水量均值
	年平均气温(T)	由遥感数据统计
	平均湿度指数(HI)	降水量/潜在蒸散发
	降水集中度(P_{CD})	由降水量数据计算
	地表净太阳辐射(S)	由遥感数据统计
植被覆盖	归一化植被指数(NDVI)	由遥感数据统计
	森林和草地占比(FG)	由土地利用数据统计
	净初级生产力(NPP)	由遥感数据统计
	叶面积指数(LI)	由遥感数据统计
土层结构	黏土比例(Clay)	由土壤质地数据统计
	粉砂土比例(Silt)	由土壤质地数据统计
	砂土比例(Sand)	由土壤质地数据统计
	土壤含水量(SW)	由遥感数据统计
地形地貌	集水区平均高程(E)	由DEM计算
	地表起伏度(R)	由DEM计算
流域形态	流域面积(A)	由遥感数据统计
	流域形状系数(K)	边界长度/面积相同的圆
	河网密度(RD)	河长/流域面积
社会经济	地区生产总值(GDP)	由遥感数据统计
	人口(POP)	由遥感数据统计
	夜间灯光(OLS)	由遥感数据统计

注：DEM为数字高程模型。

1.3 研究方法

1.3.1 Q90法 Q90法被广泛用于计算生态基流，也是官方生态基流评估标准《河湖生态环境需水计算规范SLT712-2021》[15]推荐的方法。该方法提取每一年的最枯流量，将这些数据进行降序排列。然后，利用公式(1)计算各年最小流量出现频率(P)，绘制皮尔逊Ⅲ型分布曲线[16]。最后，将频率达到90%所对应的流量视为生态基流。

$$P=\frac{r}{n+1}\times 100\% \tag{1}$$

式中：n为样本总数；r为样本的秩。

1.3.2 自组织映射 自组织映射(SOM)由Kohonen[17]提出，是一种人工神经网络，可用于在大型多元数据集中提取模式或查找聚类。在SOM中，多维输入数据被映射到二维空间，在多维空间中接近的输入数据具有在二维地图上接近的节点。

地图大小(输出神经元的数量)对于SOM至关重要。经验法则$m=5\sqrt{n}$用于初步估计神经元的数量(n为分析样本的数量，m为初步估计的神经元数量)。此外，为了优化地图大小，节点数在计算出的m值上下范围进行训练，使用量化误差(Q_E)评估训练地图的质量[18]。Q_E是每个样本数据(x_i)与其最接近的地图单元(m_c)之间的距离差，并对所有数据点进行平均，计算公式如下：

$$Q_E=\frac{1}{n}\sum_i\left\|m_c-x_i\right\|=\frac{1}{n}\sum_i\sqrt{\left(m_c^2+x_i^2-2m_cx_i\right)} \tag{2}$$

1.3.3 *K*-means聚类 *K*-means聚类算法是最常用的SOM聚类方法[19]。Davies-Bouldin指数(DBI)可用于根据其最小值决定最佳聚类数的规则来衡量聚类的有效性[20]。该指数计算公式如下：

$$\mathrm{DBI}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\max_{j\neq i}\left[\frac{c_i+c_j}{d\left(c_i,c_j\right)}\right] \tag{3}$$

式中：c_i+c_j为所有数据点到簇质心点的平均距离之和；$d\left(c_i,c_j\right)$为簇i和j的质心点之间的距离；k为聚类数。

族群内方差和(WGSS)也是用来确定聚类数的一个常用指标，WGSS会随着聚类数的增加而减小，拐点处为最佳聚类数，计算公式如下：

$$\mathrm{WGSS}=\sum_{l=1}^{k}\sum_{i\in G_l}\left(x_i-\bar{x}^{(l)}\right)'\left(x_i-\bar{x}^{(l)}\right) \tag{4}$$

式中：G_l为族群；$\bar{x}^{(l)}$为第l个聚类的均值。

1.3.4 偏最小二乘结构方程 偏最小二乘结构方程(PLS-SEM)是常用于估计具有潜在变量及其关系的路径模型[21]。PLS-SEM由2部分组成：内部模型和外部模型。内部模型显示了潜在变量之间的关系，路径系数是每个潜在变量对其直接前因变量进行回归的结果。外部模型表示每个潜在变量与其相

关的观察变量之间的关系，计算公式如下：

$$IV = a \times LV + e \tag{5}$$

式中：IV为观察变量；LV为潜在变量；a为量化IV与LV之间的回归系数；e为随机测量误差。与相关系数相比，PLS-SEM更好地揭示了变量之间关系的强度和方向，并避免了回归分析中常见的参数估计偏差[22]。

1.3.5　生态基流占比阈值计算方法　生态基流占比阈值是指生态基流在变化环境下的波动范围。对于生态基流占比阈值，本研究采用了刘欢等[23]提出的计算公式：

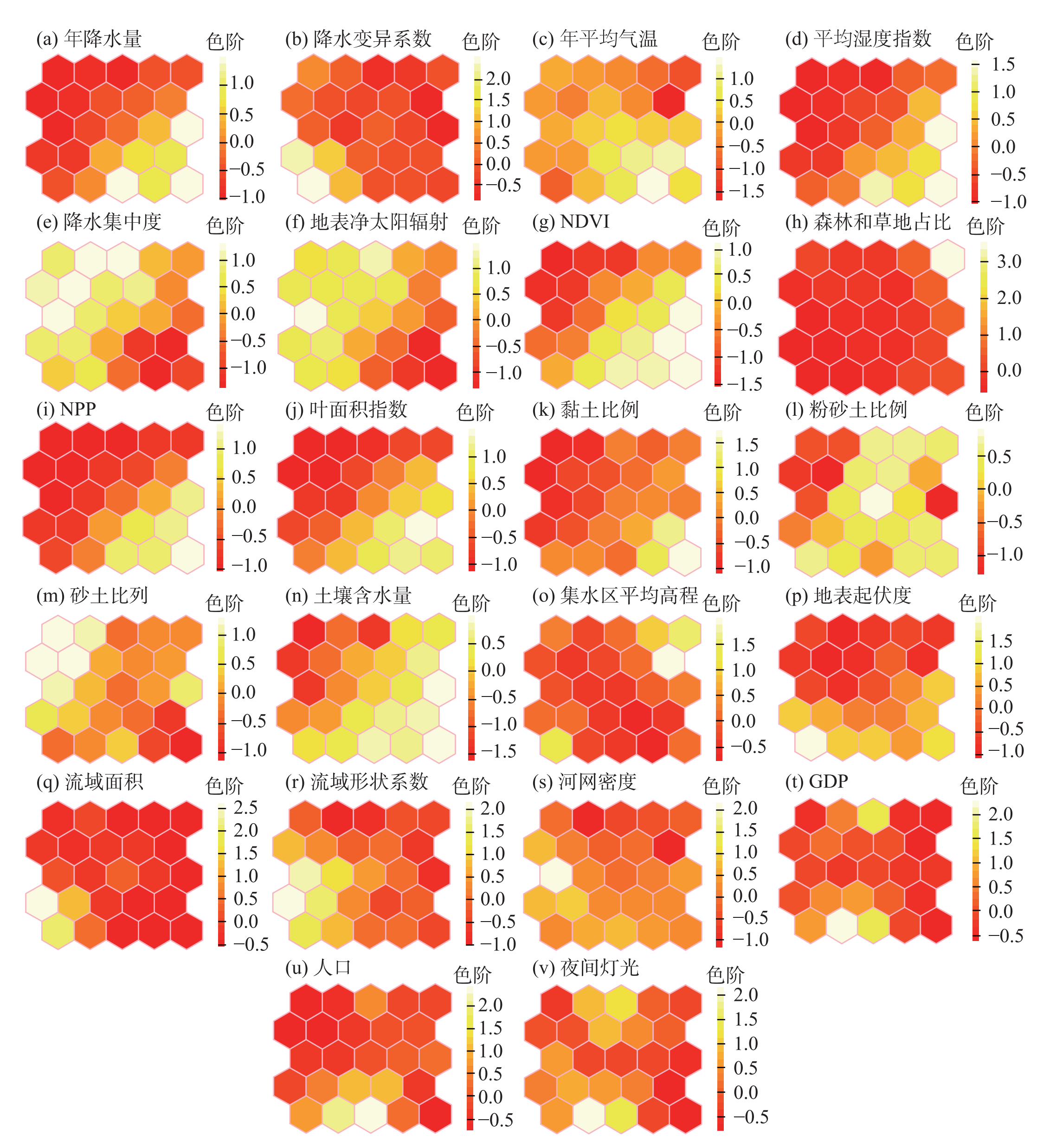
$$T_i = \frac{\left(BM_{avg,\,i} + BM_{p50,\,i}\right)}{2} \tag{6}$$

式中：T_i为第i个子区域生态基流占比（即生态基流占多年平均天然径流的百分比）的阈值；$BM_{avg,\,i}$和$BM_{p50,\,i}$分别为第i个子区域代表性河段生态基流占比的均值和中值。

2　结果与分析

2.1　秦岭山区–黄土高原子区域划分及其特征

2.1.1　子区域划分　本研究选取秦岭山区–黄土高原38个水文站断面作为研究对象，使用SOM对影响因子进行归一化处理，映射到25个神经元（图2）。研究发现，NDVI、NPP、地表起伏度、年降水量、年平



注：NDVI为归一化植被指数；NPP为净初级生产力；GDP为地区生产总值。下同。

图2　自组织映射（SOM）中的变量特征

Fig. 2　Variable characteristics in SOM

均气温、黏土比例、平均湿度指数、土壤含水量、叶面积指数呈现相似的模式，表明这些因素是相关的，但地表净太阳辐射、降水集中度、砂土比例、集水区平均高程与上述因子的变化规律相反。GDP、人口、夜间灯光呈现出相似的规律，这体现了各社会经济因素之间的相关性。流域形状系数、河网密度呈现出相似的规律，它们都属于流域形态因素。此外，降水变异系数、森林和草地占比、流域面积也呈现相似的颜色分布，据此本研究提出在下文PLS-SEM中加入"其他"来表示这3个具有相似模式的变量。粉砂土比例和砂土比例存在明显的互补性，它们和黏土比例的分布有很大不同。这些被SOM降维处理后的数据将用作*K*-means聚类的输入数据，且这些特征将对建立结构方程有所帮助。

K-means聚类用来确定流域子区域。DBI指数、WGSS碎石图(图3)显示4为最佳聚类数。根据*K*-means聚类结果考虑不同族群的位置分布，并考虑河流水系的完整性。将研究区划分为如图4所示的4个子区域。分区内，黄土高原中部有15个样本点；秦岭南麓有9个样本点；秦岭北麓有12个样本点；黄土高原西北部有2个样本点，主要集中在宁夏河套平原地区。各子区域沿纬线呈不规则带状。

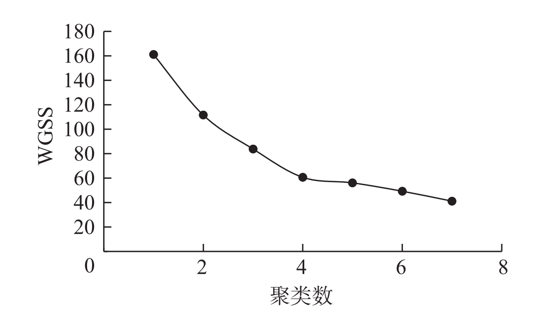


图3 族群内方差和(WGSS)碎石图

Fig. 3 Scree plot of within-group sum of squares (WGSS)

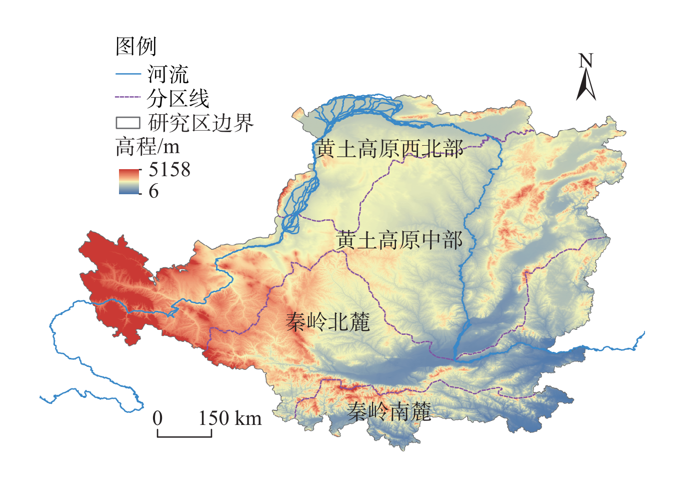


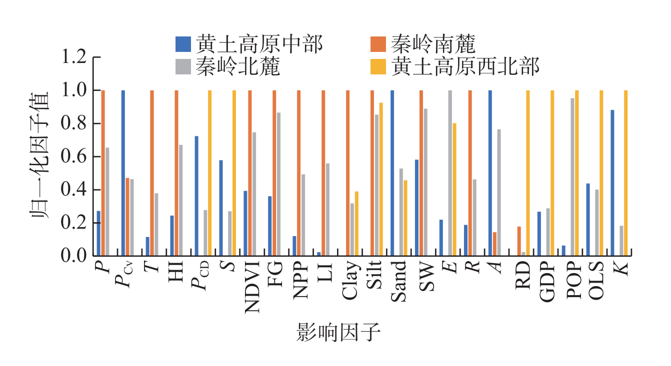
图4 秦岭山区-黄土高原4个子区域分布

Fig. 4 Distribution of the four sub-regions in the Qinling Mountains-Loess Plateau

2.1.2 不同子区域控制因子特征 聚类中心(图5)代表子区域的平均水平。黄土高原中部土壤以砂土为主、降水量年际波动较大、河网稀疏。秦岭北麓集水区平均高程较高，人口密集，很多因子处于中等水平，是黄土高原中部与秦岭南麓的过渡区。秦岭南麓有更低的纬度，受秦岭山脉的影响，气候、植被等与其他子区域有较大差异，降水量、年平均气温、湿度、植被覆盖均在4个子区域中最高，水热资源充沛，土壤以黏土为主；其次，秦岭南麓还有浅层土壤含水量高、地表起伏大、集水区平均高程较低等特点；但是，社会经济和地表净太阳辐射处于4个子区域中最低水平，降水全年分布较均匀。黄土高原西北部降水集中于汛期且降水较少、地表净太阳辐射高、地形平坦、社会经济发达。

2.2 生态基流空间分布特征及其阈值

2.2.1 生态基流空间分布特征 生态基流在不同水文站断面存在较大差异，皇甫川、隆德等水文站断面生态基流低于0.1 $m^3 \cdot s^{-1}$，而兰州、向家坪等水文站断面生态基流接近10 $m^3 \cdot s^{-1}$。黄土高原中部分区中位于东部的河流，生态基流处于低水平(图6)。秦岭南麓气候湿润、水资源充沛，子区域内各水文站断面生态基流水平差异相对较小。秦岭北麓相对于南麓来说生态基流更小，区域内韩府湾、泾河源、彭阳、黑峪口、隆德等水文站断面生态基流仅0.1 $m^3 \cdot s^{-1}$左右。生态基流在不同河流存在较大差异，干流及靠近河流源头的水文站断面生态基流较大。



注：各影响因子含义见表1。

图5 子区域聚类中心特征

Fig. 5 Characteristics of sub-region cluster centers

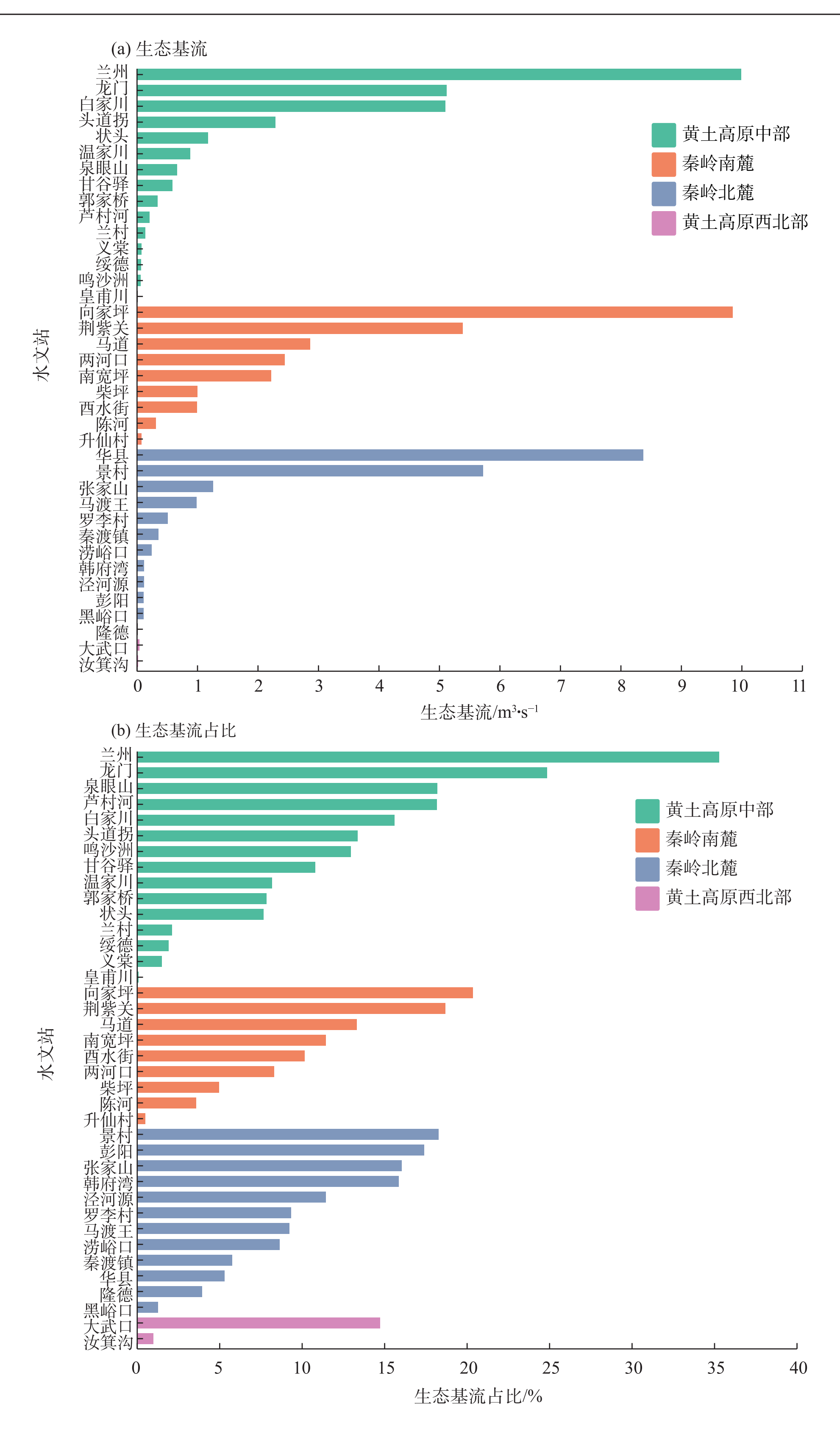
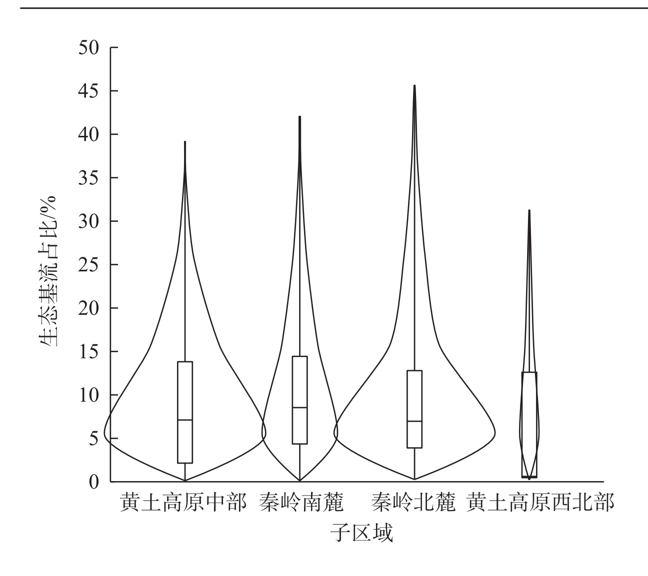


图6 不同断面生态基流及其占比

Fig. 6 Ecological base flow and its proportion across different cross-sections

生态基流占比与蒙大拿法推荐的10%~30%多年平均流量比较，38个水文站断面中有19个低于10%，体现了Q90法在计算生态基流时侧重于枯水期。黄土高原中部，兰州站较高的枯水期流量产生



注：矩形代表25%~75%分位点；矩形中横线代表平均值。

图7 生态基流占比小提琴图

Fig. 7 Violin chart of ecological base flow proportion

了较高的生态基流占比，而东部的其他站点多处于10%~30%范围内。黄土高原中部和秦岭北麓数据点呈现出矮胖的分布形态(图7)，大部分水文站断面的生态基流集中在5%附近。秦岭南麓的样本点多位于长江流域，分布较为均匀。

2.2.2 子区域生态基流占比阈值 生态基流在空间上存在一定的分布规律，子区域生态基流占比阈值可以体现子区域的整体水平及子区域间差异。所有子区域生态基流占比的均值都大于中值，子区域内存在较大值，且有多于50%的样本点低于平均值，体现了研究区水资源分配不均匀的特点(表2)。黄土高原中部、秦岭南麓、秦岭北麓、黄土高原西北部生态基流占比阈值分别为7.9%、9.5%、7.5%、4.1%。生态基流占比阈值的设定有助于保护河流和水体的生态系统，防止过度取水和流量减少对生态环境造成的不利影响，在水资源管理和环境保护中扮演着重要的角色。

2.3 生态基流影响因素

基于子区域划分，构建了反映控制因子对生态基流占比影响的偏最小二乘结构方程(图8)。由于气候因子过多，故分成2个潜在变量。同时，加入潜在变量“其他”来提高模型精度。黄土高原中部，模型可以解释90.5%的生态基流占比变化，具有较高的精度；气候1、植被与生态基流占比呈负相关，气候、土层结构、“其他”呈显著正相关，流域形态、社会经济呈微弱正相关。秦岭南麓，模型解释力98.0%；气候、地形地貌与生态基流占比呈负相关，植被、“其他”呈正相关。秦岭北麓，模型解释力85.3%；气候1、“其他”、植被、土层结构、流域形态与生态基流占比呈负相关，气候、社会经济呈正相关。

表2 子区域生态基流占比阈值

Tab. 2 Sub-regional ecological base flow thresholds

子区域	均值/%	中值/%	生态基流占比阈值/%
黄土高原中部	8.7	7.1	7.9
秦岭南麓	10.5	8.5	9.5
秦岭北麓	7.9	7.0	7.5
黄土高原西北部	7.5	0.6	4.1

2.4 生态基流占比阈值模拟

在黄土高原中部、秦岭南麓、秦岭北麓建立生态基流占比与主要影响因子之间的线性回归方程，来表示生态基流随着控制因子的变化。同时，也表示生态基流的动态阈值，当相应因子变化时，其生态基流占比阈值也会随之变化，增加了生态基流占比阈值计算的灵活性。控制因子选取前文PLS-SEM方程内部模型路径系数较大的潜在变量。然后，在这些潜在变量中选择路径系数大于0.5的控制因子。最后，在这些因子中根据决定性系数(R^2)最大原则来确定最终模型。该多元线性回归方程的成功建立，以及对生态基流占比(BM)有着较高的解释力，说明了这些因子对生态基流变化存在着重要的影响力，各模型及其公式如下：

在黄土高原中部以叶面积指数(LI)、地表起伏度(R)、NPP、年平均气温(T)作为控制因子，模型R^2为0.871，模型可以解释生态基流占比87.1%的变化，各回归系数及常数均显著(P<0.05)，模型公式为：

$$\mathrm{BM} = 11.408 - 18.929 \times \mathrm{LI} + 0.013 \times R + 0.082 \times \mathrm{NPP} - 2.197 \times T \tag{7}$$

在秦岭南麓以森林和草地占比(FG)、流域面积(A)、NDVI作为控制因子，模型R^2为0.950，模型可以解释生态基流占比95%的变化，各回归系数及常数均显著(P<0.01)，模型公式为：

$$\mathrm{BM} = -413.001 - 242.51 \times \mathrm{FG} + 0.004 \times A + 754.283 \times \mathrm{NDVI} \tag{8}$$

在秦岭北麓以年降水量(P)、流域形状系数(K)、NPP、粉砂土比例(Silt)作为控制因子，模型R^2为0.871，模型可以解释生态基流占比87.1%的变化，各回归系数及常数均显著(P<0.05)，模型公式为：

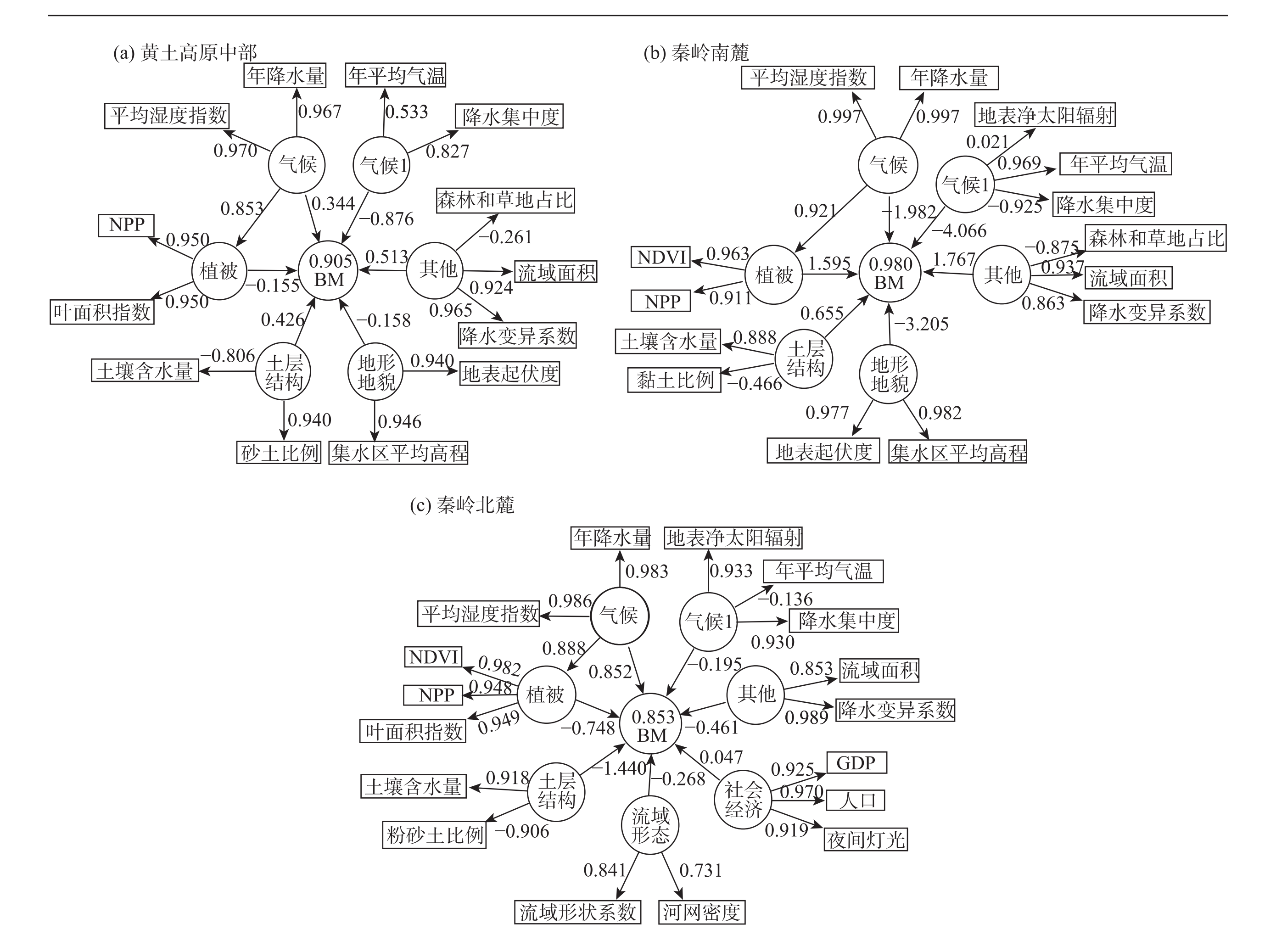


图8　偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)结构图

Fig. 8　Structure chart of partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)

$$BM = -14.393 + 8.825 \times P - 18.159 \times K - 0.027 \times NPP + 1.521 \times Silt \tag{9}$$

这些方程主要影响因子的差异体现了生态基流的空间异质性，且可用于该地区生态基流占比阈值的估算以及对生态基流调控提供参考。

3　讨论

基于秦岭山区-黄土高原地区生态基流的空间异质性特征，深入研究了其影响因素及阈值。通过构建一个包含22个影响因素的生态基流控制因子体系，考察了气候、植被覆盖、地形地貌、土层结构、流域形态与社会经济6个方面对生态基流的作用。基于此体系，本研究在秦岭山区-黄土高原地区划分了子区域。

研究发现，本研究生态基流计算结果与曹原等[24]在渭河流域所计算生态基流大体一致，无定河流域白家川断面计算结果也位于王小帆等[25]推荐的3.32~7.66 $m^3 \cdot s^{-1}$区间内。因此，本研究生态基流计算结果合理可靠。干流及河流源头生态基流较大，河流源头受高山冰雪融水影响[26]，枯水期水资源充沛，干流作为河流系统的主要部分，承载着大量的水流。与支流相比，干流由于其规模较大，流域面积广泛，水量充沛，需要更高的生态基流来保持其生态系统的健康和稳定。

使用SOM因子的PLS-SEM模型的研究揭示了不同区域内影响生态基流的关键因素的地域性差异：在黄土高原中部地区，降水集中度对生态基流的影响尤为重要；而在秦岭南麓地区，则年平均气温的影响更加显著。这些发现与李婷等[27]在黄土高原的研究结果相吻合，后者也指出气候因素对生态基流具有重要的影响作用。秦岭北麓的土壤含水量为主要影响因素，Price[28]的研究表明，土壤特性，尤其是土壤水分，是影响基流维持与变化的关键因素。空间上从北向南，影响生态基流的因素对

其响应的敏感性逐渐增强。同时,气候通过改变植被状况间接影响生态基流,其影响力在空间上从北向南逐步增大。Lei等[29]的研究表明气候会通过影响植被间接影响径流。

黄土高原中部土壤以砂土为主,对生态基流产生正向影响。中砂土壤的良好透水性有助于地下水形成并补给河道生态基流[30]。相反,在秦岭南麓,黏土含量较高,对生态基流产生负面影响[31]。土壤类型的差异表明,中砂土比黏土更有利于生态基流的保障。气候条件对黄土高原中部和秦岭北麓的生态基流既有正面也有负面影响,而在秦岭南麓主要表现为负面影响,显示出气候条件对黄土高原生态基流影响的一致性及其与秦岭南麓的差异性。植被在黄土高原中部和秦岭北麓对生态基流具有负面影响,在秦岭南麓则为正面影响。这表明在水资源短缺的黄土高原,植被竞争可能降低生态基流量,傅伯杰等[32]的研究表明黄土高原的植被建设已接近水资源植被承载力的极限,Wu等[33]对黄土高原及秦岭过渡带(巫山站)的研究表明植被覆盖的增加会减少径流。而在水资源丰富的秦岭南麓,则能够对生态基流产生积极作用,Xiao等[34]的研究表明在降水充沛的情况下,植被通过其根系可以帮助土壤吸收并保留更多的降水。

本研究取得了一些发现,但存在局限性。结果可能不适用于其他地域。为了得到普遍性的结果,可能需要进行更广泛的全球研究。本研究考虑了22个影响因子,包括气候、植被、地形地貌等,但可能还有其他影响因子未被考虑到,如土壤类型、地下水状况等。关于模型预测的准确性,虽然本研究建立的线性回归模型的决定系数都大于0.87,但仍可能存在预测误差。

通过对秦岭山区-黄土高原地区生态基流的深入研究,可以更深入地理解各种因素如何影响生态基流,并据此制定更有效的水资源管理策略。这项研究不仅对当前的水资源管理具有重要意义,而且对于预测和应对未来可能的气候变化影响也具有重要的参考价值。

4 结 论

(1) 根据流域的控制因子体系及河网水系空间分布,将秦岭山区-黄土高原划分成4个子区域,分区呈不规则带状。生态基流在不同河流存在较大差异,干流及靠近河流源头的水文站断面生态基流较大,生态基流在黄土高原中部、秦岭北麓空间差异较大,在秦岭南麓生态基流空间分布更均匀。黄土高原中部、秦岭南麓、秦岭北麓、黄土高原西北部生态基流占比阈值分别为7.9%、9.5%、7.5%、4.1%。

(2) 黄土高原中部生态基流主控因素为降水集中度;秦岭南麓生态基流主控因素为年平均气温;秦岭北麓主控因素为土壤含水量。气候通过改变植被状况间接影响生态基流,其影响力在空间上从北向南逐渐增大。土壤类型的差异表明,中砂土比黏土更有利于生态基流的保障。黄土高原的植被覆盖增加对生态基流有负面影响,秦岭南麓的植被覆盖增加对生态基流有正面影响。

(3) 建立了可用于模拟不同流域生态基流占比的线性回归模型。以叶面积指数、地表起伏度、NPP、年平均气温作为影响因素建立的黄土高原中部生态基流占比模型的R^2为0.871;以森林和草地占比、流域面积、NDVI为影响因素建立的秦岭南麓基流占比模型的R^2为0.950;以年降水量、流域形状系数、NPP、粉砂土比例为影响因素建立的秦岭北麓基流占比模型的R^2为0.871。

参考文献(References)

[1] Acreman M C, Dunbar M J. Defining environmental river flow requirements: A review[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(5): 861-876.

[2] 孙然好, 魏琳沅, 张海萍, 等. 河流生态系统健康研究现状与展望——基于文献计量研究[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3526-3536. [Sun Ranhao, Wei Linruan, Zhang Haiping, et al. Current status and prospects of river ecosystem health research based on bibliometric analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3526-3536.]

[3] 王中根, 赵玲玲, 陈庆伟, 等. 关于生态流量的概念解析[J]. 中国水利, 2020(15): 29-32. [Wang Zhonggen, Zhao lingling, Chen Qingwei, et al. Analysis of the ecological flow concept[J]. China Water Resources, 2020(15): 29-32.]

[4] 易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(4): 363-377. [Yi Yujun, Zhang Shanghong. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(4): 363-377.]

[5] 齐丽. 太子河上游河道内适宜生态需水分析[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(4): 39-41. [Qi Li. Analysis of suitable ecological water demand in upper reaches of Taizi River[J]. Heilongjiang Hy-

draulic Science and Technology, 2021, 49(4): 39-41.]

[6] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 1-11. [Xu Zongxue, Wu Wei, Yu Songyan. Ecological baseflow: Progress and challenge[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 1-11.]

[7] 周晨晖. 生态需水理论在金塔区供水工程中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(3): 111-114. [Zhou Chenhui. Application of ecological water demand theory in water supply project of Jinta District[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2024, 52(3): 111-114.]

[8] 王一艳, 杨涛, 王伟, 等. 渭河生态基流时空分异特征及保障率分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3): 66-75. [Wang Yiyan, Yang Tao, Wang Wei, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and guarantee rate of the environmental flow in Weihe River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(3): 66-75.]

[9] 李娟, 高建恩, 张元星, 等. 黄土高原泾河流域梯田对河道径流及生态基流影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 106-110, 116. [Li Juan, Gao Jian'en, Zhang Yuanxing, et al. Effects of terrace on runoff and ecological base flow of Jinghe Watershed in Loess Plateau region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5): 106-110, 116.]

[10] 梁鹏飞, 辛惠娟, 李宗省, 等. 祁连山黑河径流变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1460-1471. [Liang Pengfei, Xin Huijuan, Li Zongxing, et al. Runoff variation characteristics and influencing factors in the Heihe River Basin in the Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1460-1471.]

[11] 郑爱勤. 渭河关中段地下水对河流生态基流的保障研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013. [Zheng Aiqin. The guarantee of groundwater on river ecological base flow in Guanzhong section of Weihe River Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.]

[12] 王慧娴, 杨蓓, 杨宁君, 等. 黄河流域旅游经济差异及关键驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(3): 515-527. [Wang Huixian, Yang Bei, Yang Ningjun, et al. Tourism economic differences and key driving factors in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(3): 515-527.]

[13] Beskow S, de Mello C R, Vargas M M, et al. Artificial intelligence techniques coupled with seasonality measures for hydrological regionalization of Q90 under Brazilian conditions[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 1406-1419

[14] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[15] SLT712-2021. 河湖生态环境需水计算规范[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2021. [SLT712-2021. Specification for calculation of ecological flow for rivers and lakes[S]. Beijing: The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2021.]

[16] Koutrouvelis I A, Canavos G C. Estimation in the Pearson type 3 distribution[J]. Water Resources Research, 1999, 35(9): 2693-2704.

[17] Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps[J]. Biological Cybernetics, 1982, 43(1): 59-69.

[18] Park Y S, Céréghino R, Compin A, et al. Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters[J]. Ecological Modelling, 2003, 160(3): 265-280.

[19] Hentati A, Kawamura A, Amaguchi H, et al. Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the self-organizing map[J]. Geomorphology, 2010, 122(1-2): 56-64.

[20] Davies D L, Bouldin D W. A cluster separation measure[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1979(2): 224-227.

[21] Sarstedt M, Ringle C M, Hair J F. Partial least squares structural equation modeling[M]. Cham: Springer, 2021: 587-632.

[22] Calantone R J, Graham J L, Mintu-wimsatt A. Problem-solving approach in an international context: Antecedents and outcome[J]. International Journal of Research in Marketing, 1998, 15(1): 19-35.

[23] 刘欢, 胡鹏, 王建华, 等. 中国河流分区分类生态基流占比阈值确定[J]. 南水北调与水利科技, 2022, 20(4): 748-756. [Liu Huan, Hu Peng, Wang Jianhua, et al. Determination of the proportion thresholds of ecological base flow in rivers with different scales in different watersheds of China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 748-756.]

[24] 曹原, 李娅芸. 陕西省渭河控制断面生态流量目标及调度措施[J]. 地下水, 2024, 46(2): 240-242. [Cao Yuan, Li Yayun. Ecological flow objectives and management for Wei River control points in Shaanxi Province[J]. Ground Water, 2024, 46(2): 240-242.]

[25] 王小帆, 苗磊, 翟城武. 基于无定河生态流量保障的水资源调度研究[J]. 陕西水利, 2024(4): 32-35. [Wang Xiaofan, Miao Lei, Zhai Chengwu. Research on water resources regulation based on the guarantee of ecological flow in Wuding River Basin[J]. Shaanxi Water Resources, 2024(4): 32-35.]

[26] Liu H, Hu P, Wang J H, et al. A flexible framework for regionalization of base flow for river habit maintenance and its thresholds[J]. Science of the Total Environment, 2023, 876: 162748, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162748.

[27] 李婷, 吕一河, 任艳姣, 等. 黄土高原植被恢复成效及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8593-8605. [Li Ting, Lü Yihe, Ren Yanjiao, et al. Gauging the effectiveness of vegetation restoration and the influence factors in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8593-8605.]

[28] Price K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2011, 35(4): 465-492.

[29] Lei H M, Yang D W, Huang M Y. Impacts of climate change and vegetation dynamics on runoff in the mountainous region of the

Haihe River Basin in the past five decades[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 786-799.

[30] 冯憬, 卫伟, 冯青郁. 黄土丘陵区SCS-CN模型径流曲线数的计算与校正[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4170-4181. [Feng Jing, Wei Wei, Feng Qingyu. The runoff curve number of SCS-CN method in loess hilly region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4170-4181.]

[31] 宋林辉, 黄强, 闫迪, 等. 水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1635-1641. [Song Linhui, Huang Qiang, Yan Di, et al. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1635-1641.]

[32] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110-1117. [Fu Bojie, Liu Yansui, Cao Zhi, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1110-1117.]

[33] Wu Y R, Zhang H B, Lan T, et al. Attribution of runoff variation to climate and human-driven changes in the transition zone between the Qinling Mountains and the Loess Plateau under vegetation greening[J]. Hydrology Research, 2022, 53(5): 733-753.

[34] Xiao T, Li P, Fei W B, et al. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review [J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: 167524, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167524.

Regional differences and threshold of ecological base flow in the Qinling Mountains-Loess Plateau region

YANG Xiaoya[1], YU Kunxia[1], LI Zhanbin[1], LI Peng[1,2], LIU Yonggang[3], MO Shuhong[1], YANG Jianhong[3]

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. China Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Provincial Water Resources and River Reservoir Dispatching Center, Xi'an 710004, Shaanxi, China)

Abstract: The Qinling Mountains-Loess Plateau geological and geomorphological continuum features a fragile ecosystem where river ecological base flow and its thresholds are critical for ecosystem protection. This study examines the Qinling Mountains-Loess Plateau region in China, constructing a system of 22 ecological base flow influencing factors, including climate, vegetation, topography, soil structure, watershed morphology, and socio-economic variables. Using a self-organizing map (SOM) neural network and *K*-means clustering analysis, the region was divided into four sub-regions: the central Loess Plateau, southern Qinling, northern Qinling, and northwestern Loess Plateau. Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) was applied to model and analyze ecological base flow influencing factors in three sub-regions. The results indicate that: (1) Ecological base flow is primarily influenced by precipitation concentration in the central Loess Plateau, by annual mean temperature in the southern Qinling, and by soil moisture content in the northern Qinling. (2) Significant regional differences were observed in ecological base flow thresholds, with values of 7.9% for the central Loess Plateau, 9.5% for the southern Qinling, 7.5% for the northern Qinling, and 4.1% for the northwestern Loess Plateau. (3) A linear regression model was developed to calculate and simulate ecological base flow, with determination coefficients exceeding 0.87, accounting for regional differences in environmental response. These findings provide a robust scientific basis for the quantitative estimation of ecological base flow, offer insights into river health maintenance and sustainable water resource utilization, and hold substantial theoretical and practical significance.

Key words: ecological base flow; cluster analysis; flow threshold; structural equation; influencing factors